

DOI: 10.11779/CJGE201508009

# 低围压水平下 QH-E 模拟月壤三轴试验技术与力学特性

邹维列<sup>1</sup>, 陈 轮<sup>\*2</sup>, 张俊峰<sup>1</sup>, 刘小顺<sup>3</sup>, 童朝霞<sup>4</sup>

(1. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;

3. 武汉正华建筑设计有限公司, 湖北 武汉 430072; 4. 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 月球的低重力环境对月面浅层月壤力学特性的影响很大。利用清华大学取自吉林省靖宇县境内的火山灰岩研制出的模拟月壤 (QH-E), 对 GCTS 公司生产的 STX 型动/应力路径三轴仪重新配置高精度的传感器, 并采取专门的试验技术, 成功实施了一系列低围压水平 (3.13~25 kPa) 的三轴压缩试验。试验结果表明, 在低围压水平下: 模拟月壤具有显著的剪胀效应; 与常规围压水平 (50~150 kPa) 结果相比, 同一相对密度模拟月壤的峰值摩擦角更高; 相对密度越高, 峰值摩擦角越大; 切线模量和剪切模量均随着围压和相对密度的减小而减小; 剪胀角随围压的减小和相对密度的增大而增大, 且低围压水平下剪胀角对围压变化十分敏感。最后就低围压下 QH-E 模拟月壤与饱和砂土特性的差异, 及重力场环境和施加围压的介质的影响进行了讨论。

**关键词:** QH-E 模拟月壤; 低围压; 剪切强度; 摩擦; 剪胀

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)08-1418-08

**作者简介:** 邹维列 (1969-), 男, 重庆丰都人, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土特性、土工合成材料应用、道路中的岩土工程问题等方面的教学和科研工作。E-mail: zwilliam@126.com。

## Techniques for triaxial compression tests on simulant lunar soil QH-E and its mechanical behaviors under low confining stress

ZOU Wei-lie<sup>1</sup>, CHEN Lun<sup>2</sup>, ZHANG Jun-feng<sup>1</sup>, LIU Xiao-shun<sup>3</sup>, TONG Zhao-xia<sup>4</sup>

(1. College of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering,

Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Wuhan Zhenghua Architectural Design Co., Ltd., Wuhan 430072, China; 4. School of  
Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** A series of typical triaxial compression tests are conducted on simulant lunar soil QH-E, which is originated from cinerite from Jingyu County, Jilin Province and is developed by Tsinghua University. For the triaxial compression tests on QH-E under low confining stress, highly sensitive transducers are used to measure the volume change in the water surrounding the triaxial test specimen and to control the confining stress. The test results indicate that the QH-E under low confining stresses (3.13~25 kPa) shows the conspicuous dilatancy behavior. Compared with the results from the conventional confining stresses (50~150 kPa), the peak friction angle of QH-E under low confining stresses is larger. The higher the relative density of QH-E, the larger the peak friction angle. Both the tangent modulus and the shear modulus of QH-E decrease with the decrease of the confining stress and relative density, while the dilatancy angle increases with the decrease of the confining stress and the increase of the relative density. Moreover, under low confining stresses the differences of the properties between the QH-E in this study and the saturated sands in the literatures, and the influences of both the moon/terrestrial environments and water in pressure chamber on the properties of QH-E, are discussed.

**Key words:** simulant lunar soil QH-E; low confining stress; shear strength; friction; dilatancy

## 0 引言

在月球基地建设中, 需研究地基勘察、基础类型、月壤承载能力、基坑开挖、边坡稳定以及原位资源利用 (in situ resource utilization, 简称 ISRU。如从月壤中提取氧气、将月壤用作辐射防护层、制作月壤混凝土) 等等; 在月球矿产资源开发中, 需研究挖掘机铲

斗、推土机推土板、输送装置等月壤开采设备。在地球上进行此类月壤岩土工程问题的研究, 需要采用模

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51079075)

收稿日期: 2014-10-11

\*通讯作者

拟月壤, 且往往要开展探月装置与模拟月壤相互作用的数值模拟分析, 因此还需要模拟月壤的力学特性参数。

模拟月壤是在地球上研究月壤性质所使用的替代品, 在探月工程中占有重要的地位。除美国和前苏联曾在月球上对月壤物理力学性质进行了现场测试以外, 国外一些试验室还对真实月壤的物理力学性质进行了大量的室内试验研究, 获得了相当丰富的有关月壤物理力学性质试验数据<sup>[1-3]</sup>, 为研制模拟月壤提供了重要的依据。

20世纪70年代以来, 美国研制了 Basalt #2、LSS1~LSS5、MLS-1、MLS-1A、MLS-2、JPL-1、JSC-1、JSC-1A、JSC-1AF、JSC-1AVF、JSC-1AC 等多种模拟月壤; 日本研制了 MKS-1、FJS-1; 加拿大研制了 OB-1 等<sup>[4]</sup>。在近二十多年里, 美国对 JSC-1 和 JSC-1A 模拟月壤物理力学性质的研究最多<sup>[5-11]</sup>。

为了满足中国探月工程的需要, 中国学者也开展了模拟月壤的研制工作。Zheng 等<sup>[12-13]</sup>以靖宇一辉南火山渣为主要原材料, 研制了 CAS-1 用于月壤微波辐射特性等多项研究; Li 等<sup>[14]</sup>研制了 NAO-1 用于研究月球高地月壤的化学和物理力学性质; 肖龙等<sup>[15]</sup>研制了 CUG-1A、王恺<sup>[16]</sup>研制了 QH-E 用于月球钻探取样技术的试验研究; 李志刚<sup>[17]</sup>、李建桥等<sup>[18]</sup>也研制了一系列的模拟月壤, 用于月球着陆器着陆冲击性能、月球车移动性能、不同重力场对探月装置与模拟月壤相互作用影响的试验研究; 蒋明镜等<sup>[19]</sup>研制了能够较好地模拟月壤基本力学特性的 TJ-1, 并研究了含水率和颗粒级配对 TJ-1 模拟月壤力学性能的影响<sup>[20]</sup>; 邹猛等<sup>[21-22]</sup>、杨艳静等<sup>[23]</sup>通过压板试验、三轴试验和履带板试验以及数值模拟方法研究了模拟月壤的力学特性。

月球表面的重力加速度仅约  $1.63 \text{ m/s}^2$  ( $g/6$ ), 在同一深度处, 月壤的自重应力只有地球上的  $1/6$ , 且现有的探月装置与月壤的相互作用问题大多集中在月表或月面浅层。因此, 探月活动所面对的月壤真实应力水平远小于我们在常规土力学试验研究中对试样所施加的应力水平。例如, 假定月壤在  $0\sim0.5 \text{ m}$  深度范围内, 平均密度为  $1.66 \text{ g/cm}^3$ , 内摩擦角为  $40^\circ$ , 表观黏聚力为  $0 \text{ kPa}$ , 则在  $0.5 \text{ m}$  深度处, 月壤的竖向应力只有大约  $1.35 \text{ kPa}$ , 侧向应力仅约为  $0.29 \text{ kPa}$ 。所以在探月工程研究中, 要合理反映真实月壤的力学特性, 需要对模拟月壤进行低应力水平的室内试验。

对低应力的三轴试验而言, 试验结果的可靠性和精度容易受到橡皮膜约束、试样自重、活塞自重和摩擦、试样顶帽自重、压力室内的静水压力、顶帽和底座的端部约束(摩擦)以及制样时预加的真空等 8 种因素的影响。Ponce 等<sup>[24]</sup>、Stroud<sup>[25]</sup>、Fukushina 等<sup>[26]</sup>

等较早研究了低围压下饱和砂土的特性。其中文献[26]详细介绍了减小部分因素(如活塞自重和摩擦; 顶帽、底座对试样端部摩擦)影响所采取的措施; 文献[24, 26]介绍了橡皮膜约束对轴向应力和围压影响的修正方法。不过其成果是关于饱和砂土在低围压下的特性, 而真实月壤是含水率不超过 1% 的形似干粉砂的颗粒材料, 其主要物理力学性质与地球土壤有较明显的区别, 如颗粒比重  $G_s$  较大 ( $2.9\sim3.4$ ), 相对密度  $D_r$  较大 (在月面  $0\sim60 \text{ cm}$  深度范围为 65%~92%)、内摩擦角  $\varphi$  较大 (典型值为  $42^\circ\sim54^\circ$ )、黏聚力  $c$  很小但并不为零 (由月壤的真空环境所致, 典型值约为  $0.52\sim3.0 \text{ kPa}$ )。因而饱和砂土在低围压下的特性并不能直接用作探月工程中月壤的特性。

由于上述诸多因素的影响, 低应力水平三轴试验对试样密度的控制、施加小应力的控制及其精度、变形的量测精度等方面提出了较高的要求。本文介绍用清华模拟月壤 (QH-E) 实施低应力水平三轴压缩试验的相关技术, 并提交低应力水平下 QH-E 模拟月壤的力学性质。

## 1 QH-E 模拟月壤的物理性质与颗粒形态

QH-E 是一种低钛玄武质模拟月壤, 接近于月海低钛表层月壤,  $\text{SiO}_2$  含量很高 (见表 1)<sup>[16]</sup>, 是清华大学采用取自吉林省靖宇县的火山灰岩块, 经雷蒙磨粉碎后研制而得。其含水率为 0.2%, 比重为 2.74, 最大、最小干密度分别为  $1.72, 1.21 \text{ g/cm}^3$ , 相应的最小、最大孔隙比分别是 0.59 和 1.45。

从表 1 可见, 靖宇火山灰大部分成分及含量与 Apollo 14 的月壤样品十分相近, 与美国 JSC-1 模拟月壤、日本 MKS-1 模拟月壤的化学成分及含量也很相

表 1 QH-E、Apollo 样品、JSC-1、MKS-1 模拟月壤化学成分

Table 1 Comparison of chemical components among QH-E samples, Apollo samples and a few lunar soil stimulants (%)

化学成分	QH-E	Apollo 11	Apollo 14	JSC-1	MKS-1
$\text{SiO}_2$	50.70	42.20	48.10	47.710	52.69
$\text{TiO}_2$	2.31	7.80	1.70	1.590	1.01
$\text{Al}_2\text{O}_3$	15.63	13.60	17.40	15.020	15.91
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0.05	0.30	0.23	—	—
$\text{FeO}$	11.35	15.30	10.40	7.350	7.50
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.70	—	—	3.440	4.78
$\text{MnO}$	0.18	0.20	0.14	0.180	0.22
$\text{MgO}$	4.22	7.80	9.40	9.010	5.41
$\text{CaO}$	7.48	11.90	10.70	10.420	9.36
$\text{Na}_2\text{O}$	3.58	0.47	0.70	2.700	1.90
$\text{K}_2\text{O}$	2.48	0.16	0.55	0.820	0.58
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.86	0.05	0.51	0.660	0.14
LOI	—	0.12	—	0.111	0.50
合计	99.54	99.90	99.83	99.650	100.00

似,但在某些化合物的含量上比这两种模拟月壤更为接近。月壤样品中不含  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 说明月壤完全没有风化。而靖宇火山灰的  $\text{FeO}$  含量比美国 JSC-1、日本 MKS-1 要高, 说明风化程度较低, 与月壤更接近<sup>[16]</sup>。

QH-E 颗粒级配曲线见图 1<sup>[16]</sup>。采用 GE-5 型数码显微仪对样品拍照观察发现, 组成 QH-E 样品的火山灰颗粒表面极不规则, 棱角分明 (图 2)<sup>[16]</sup>。

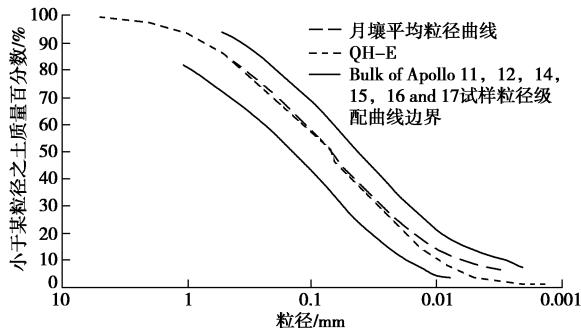


图 1 QH-E 模拟月壤的颗粒级配曲线 (根据文献[16]重画)

Fig. 1 Distribution curves of particle size of QH-E and upper and low boundaries of bulk of Apollo samples (After [16])

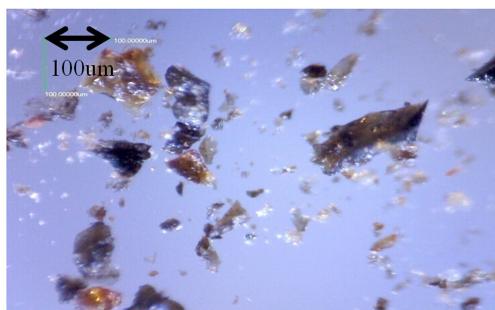


图 2 QH-E 颗粒放大 540 倍的显微照片

Fig. 2 Microscopic image of QH-E particles at 540 magnification level

## 2 试验仪器、方案与步骤

### 2.1 试验仪器

采用武汉大学岩土实验室拥有的美国 GCTS 公司生产的新型 STX 土工动三轴仪系统 (图 3)。专配的内置式高精度轴力传感器 (美国 Tovey 公司生产的 2029 型, 见图 4 (a)), 不仅消除了轴向荷载杆受到摩擦所引起的误差, 而且精度达到  $\pm 4.5 \text{ N}$  (量程为 4.5 kN)。

### 2.2 试验方案

为了揭示低应力水平与常规应力水平下模拟月壤力学性质的差异, 试验方案拟定为分别在常规围压 ( $\sigma_3=50, 100$  和  $150 \text{ kPa}$ ) 和低围压 ( $\sigma_3=3.13, 6.25, 12.5, 25 \text{ kPa}$ ) 下进行三轴压缩试验。其中常规围压水平下试样的相对密度设定为 83%, 低围压水平下试

样的相对密度设定为 74%, 83% 和 92% 三种, 对应的干密度分别为  $1.58, 1.64, 1.71 \text{ g/cm}^3$ 。

### 2.3 试验步骤

(1) 等向压缩。首先在设定的围压下等向压缩至试样变形稳定。

(2) 剪切。剪切过程主要分为以下 3 个步骤: ① 加载, 以  $0.4 \text{ mm/min}$  的速率, 增加轴向荷载至试样轴向应变  $\varepsilon_1$  达到  $0.75\%$ 。② 卸载, 以  $10 \text{ kPa/s}$  的速率卸载至偏应力为 0。③ 重复加载, 仍以  $0.4 \text{ mm/min}$  的速率, 重新增加轴向荷载剪切至试样破坏。



图 3 STX 型土工动三轴仪系统

Fig. 3 STX dynamic/stress path soil triaxial system

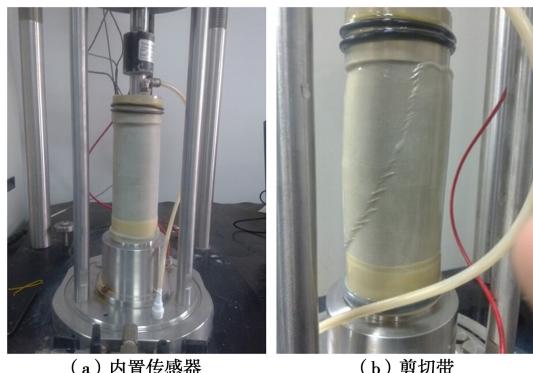


图 4 轴力传感器与试样剪切破坏

Fig. 4 Axial force transducer and developed shear band

## 3 制样技术与量测精度

### 3.1 制样技术

QH-E 模拟月壤与 Apollo 月壤样品相近, 是形似干粉砂颗粒的散粒材料, 试样制作需要直接在三轴仪压力室的试样底座上完成。

(1) 试样尺寸。本次试验采用了直径  $70 \text{ mm}$ , 高度  $140 \text{ mm}$  的大尺寸试样。其好处在于增强体变响应、降低仪器误差和边界干扰以及由于试样密度不均引起的局部响应误差<sup>[7]</sup>。

(2) 在制样模内装好橡皮膜后, 通过 STX 三轴仪系统的气泵提供  $20 \text{ kPa}$  的负压, 使橡皮膜与制样模内壁达到全面的紧密贴合, 以减小体变量测误差。

(3)为了避免表面粗糙的 QH-E 颗粒在试样压实及受剪过程中刺破橡皮膜, 同时减小膜约束效应, 橡皮膜内表面涂抹一层滑石粉, 并在制样的分层压实过程中, 不能采用击实锤自由下落击打方法, 而将与制样模内径相同的圆锤底面接触到试样表面后, 用手劲静力按压。

(4)鉴于 QH-E 的散粒性, 为了防止拆除制样模和在施加某一围压  $\sigma_3$  之前试样受到扰动, 拆模前通过试样底部的排水管对试样内部施加一定的负压(以不大于该级  $\sigma_3$  为准), 以保持试样在拆模过程中的稳定, 直至对试样施加的围压达到预定  $\sigma_3$  后再卸除。

### 3.2 传感器精度

本次采用的体变、轴压和围压传感器的精度都很高。其中体变传感器的量测精度达到了  $\pm 0.01 \text{ cm}^3$ , 转换为试样的体积应变为  $\pm 0.000019$ ; 轴压控制采用内置传感器, 量测精度为  $\pm 4.5 \text{ N}$ , 转换为试样的轴压误差为  $\pm 1 \text{ kPa}$ ; 同时系统能提供漂移值仅  $0.01 \text{ kPa}$  的围压。这些传感器精度意味着该三轴仪系统适用于模拟浅层月壤低应力水平下的测试, 也适用于涉及非常小的体应变测试。

## 4 试验结果与分析

### 4.1 应力-应变和体变特性

限于篇幅, 仅给出相对密度 83% 的 QH-E 试样分别在常规围压(50, 100, 150 kPa)和低围压(3.13, 6.25, 12.5, 25 kPa)下, 偏应力和体应变随轴向应变的变化曲线, 见图 5, 6。可以看出:

(1) QH-E 模拟月壤在常规围压和低围压下, 当偏应力(或主应力比)达到峰值以后, 均表现出显著的应变软化特性。这一特性与剪切带(图 4)的发展有关。随着剪切的继续, 因沿着剪切带的突然滑移引起主应力比下降, 会发展多个剪切带。试样的高度软化特性和多重剪切带的发展归因于模拟月壤颗粒所具有的表面粗糙、棱角分明特征, 使粒间嵌锁度高, 引起剪切带中的剪应变局部化。当第一条剪切带的发展受到试样边界的遏制, 就导致开始产生更多的剪切带。

(2) 相对密度相同的试样, 在峰值偏应力处的轴向应变随着围压的减小而降低, 而峰后软化程度(偏应力降低值)随着围压的增大而增加。

(3) 在常规围压下, 随着轴向应变的增大, 试样先剪缩(为正), 后剪胀(为负), 最后体应变逐渐趋于稳定; 但是在低围压下, 试样几乎一开始就发生剪胀, 且体应变最后并不趋于稳定。围压越小, 剪胀效应愈强烈, 体应变越大。

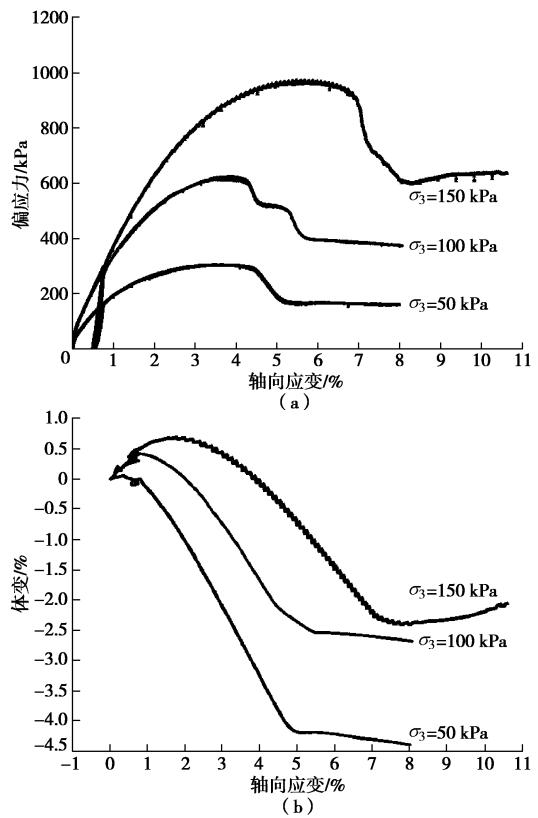


图 5 常规围压下偏应力和体应变随轴向应变的变化

Fig. 5 Relationship among deviator stress, volumetric strain and axial strain under confining stresses of 50, 100, 150 kPa ( $D_f=83\%$ )

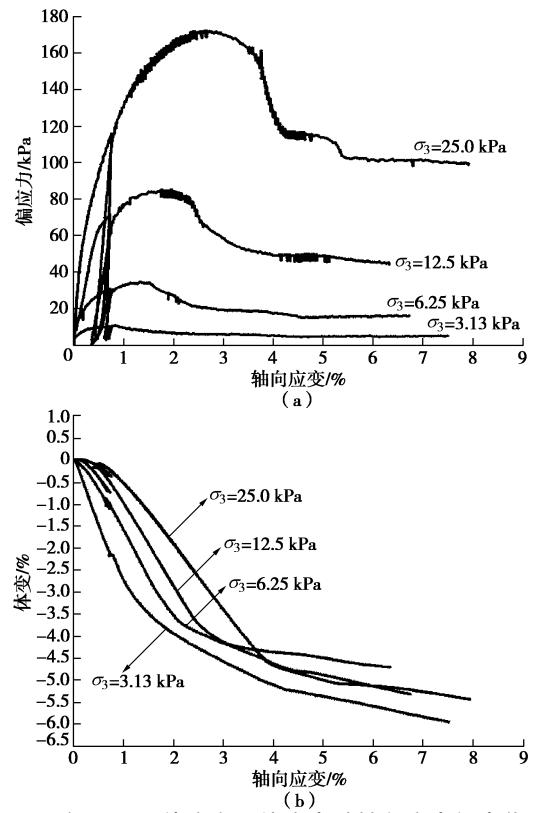


图 6 低围压下偏应力和体应变随轴向应变的变化

Fig. 6 Relationship among deviator stress, volumetric strain and axial strain under confining stresses of 3.15, 6.25, 12.5, 25 kPa ( $D_f=83\%$ )

表 2 强度参数随着围压和相对密度的变化

Table 2 Variation of strength parameters with relative density and confining stress

干密度 ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	相对 密度/%	围压 /kPa	峰值偏应力 /kPa	残余偏应力 /kPa	峰值强度参数		残余强度参数	
					$c_{\text{peak}}$ /kPa	$\varphi_{\text{peak}}$ ( $^{\circ}$ )	$c_{\text{cs}}$ /kPa	$\varphi_{\text{cs}}$ ( $^{\circ}$ )
1.58	74	3.13	16.32	1.06				
		6.25	67.50	28.53	4.10	45.13	0.00	39.03
		12.50	87.34	31.08				
		25.00	136.17	90.11				
1.64	83	50.00	390.76	205.50				
		100.00	683.13	431.00	18.80	48.17	0.47	42.55
		150.00	975.51	623.27				
		3.13	11.34	5.55				
1.71	92	6.25	35.65	16.06	3.10	51.55	0.00	38.68
		12.50	86.37	42.28				
		25.00	173.49	96.54				
		3.13	34.20	4.96				
1.71	92	6.25	100.38	23.57	5.20	54.47	0.06	40.69
		12.50	167.16	59.57				
		25.00	238.36	88.58				

#### 4.2 围压和相对密度对强度参数的影响

首先需要说明的是, 由于 QH-E 强度的明显非线性(限于篇幅没有给出), 使其莫尔圆强度包线在偏应力轴上的截距不为零。此截距值可称为“表观黏聚力”。

从表 2 可以看出:

(1) 相对密度相同(83%) 的试样, 低围压下峰值强度时的表观黏聚力(3.10 kPa) 比常规围压下峰值强度时表观黏聚力(18.80 kPa) 明显要小得多, 但其峰值强度内摩擦角却更大( $51.55^{\circ}$ ), 而残余强度水平比较接近。根据美国 STS-7 和 STS-89 使命(mission)<sup>[27]</sup>期间在 NASA 航天飞船上的微重力环境下进行的一系列三轴试验结果, F-75 渥太华砂在非常低的围压(0.05~1.30 kPa)下, 其峰值强度摩擦角达到了非常寻常的 $47.6^{\circ} \sim 70^{\circ}$ <sup>[28]</sup>; 而在地球环境里对具有相同密度的同一材料施加 10, 70 kPa 的围压时, 得到的峰值摩擦角是为 $44^{\circ} \sim 42^{\circ}$ <sup>[28]</sup>。造成试验结果差异的主要原因是试验环境不同, 详见第 5 节的讨论。

(2) 在低围压下, 相对密度对峰值摩擦角影响较大, 但对残余摩擦角的影响较小。从表 2 可见, 相对密度从 74% 增大到 92%, 峰值摩擦角从 $45.13^{\circ}$  增大到 $54.47^{\circ}$ , 而残余摩擦角仅增大不到 $2^{\circ}$ , 但对残余表观黏聚力几乎没有影响(都接近于 0)。这与 Klosky 等<sup>[7]</sup>的结论是一致的。

#### 4.3 围压和相对密度对变形参数的影响

表 3 给出了不同相对密度试样变形参数随围压的变化。可以看出, 在低围压下, 切线模量  $E$  和剪切模

量  $G$  均随着围压和相对密度的增大而增大; 剪胀角随围压的减小和相对密度的增大而增大, 当围压为 3.13 kPa 时, 剪胀角达到 $28.73^{\circ} \sim 38.81^{\circ}$ 。前述渥太华砂在微重力环境下, 在 0.05~1.30 kPa 围压范围内, 剪胀角也高至 $30^{\circ} \sim 31^{\circ}$ <sup>[28]</sup>。

表 3 变形参数随围压和相对密度的变化

Table 3 Variation of deformation parameters with relative density and confining stress

干密度 ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	相对密度 /%	围压 /kPa	切线 模量 /MPa	剪切 模量 /MPa	剪胀角 ( $^{\circ}$ )
1.51	74	3.13	9.939	2.02	28.73
1.51	74	6.25	14.31	3.51	20.20
1.51	74	12.50	18.68	4.89	16.65
1.51	74	25.00	41.31	11.95	10.52
1.58	83	3.13	16.32	3.06	31.45
1.58	83	6.25	22.07	5.29	28.14
1.58	83	12.50	31.25	8.04	21.04
1.58	83	25.00	46.11	13.86	15.33
1.65	92.0	3.13	27.98	4.30	38.81
1.65	92.0	6.25	38.10	7.28	34.44
1.65	92.0	12.50	40.43	10.53	25.33
1.65	92.0	25.00	59.37	14.58	21.34

从图 7 还可以看出, 低围压水平的剪胀角对围压的变化比常规围压水平要敏感得多。也就是说, 即使围压变化不大, 剪胀角的变化却很显著。这也说明对模拟月壤进行低围压水平的三轴试验, 围压的准确控制是很重要的。

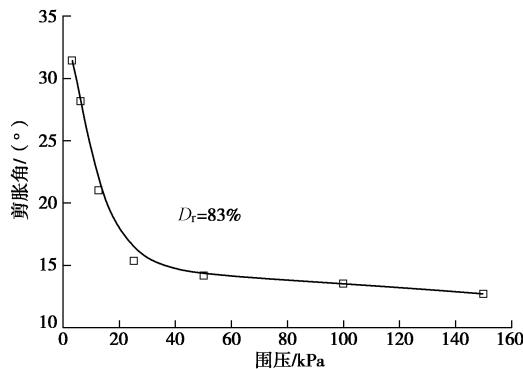


图 7 剪胀角随围压的变化

Fig. 7 Variation of diatancy angle with confining stress

#### 4.4 摩擦角和剪胀角预测模型

基于模拟月壤的高剪胀性特点, Alshibli 等<sup>[8]</sup>提出了综合考虑临界状态平均有效应力和相对密度影响的峰值摩擦角和剪胀角预测模型, 如下式所示:

$$\phi_{\text{peak}} = \phi_{\text{cs}} + A \frac{D_r^a}{p'_{\text{cs}}^b} \quad , \quad (1)$$

$$\psi = B \frac{D_r^c}{p'_{\text{cs}}^d} \quad . \quad (2)$$

式中  $\phi_{\text{peak}}$  为峰值状态摩擦角,  $\phi_{\text{cs}}$  为临界状态摩擦角;  $\psi$  为剪胀角,  $D_r$  为相对密度,  $p'_{\text{cs}} = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ , 为临界状态平均有效应力,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  分别对应于三轴试验中的大、小主应力;  $A$ ,  $B$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  和  $d$  均为模型参数。

采用式(1)、(2), 基于本次一系列低围压下的试验数据, 可得到 QH-E 模拟月壤的模型参数, 从而给出 QH-E 模拟月壤在低围压水平下的峰值摩擦角和剪胀角的预测模型。该模型的预测曲线和本次试验数据的比较如图 8 所示。可见预测结果与实测数据比较符合。

$$\phi_{\text{peak}} = \phi_{\text{cs}} + 82.52 \frac{D_r^{0.4523}}{p'_{\text{cs}}^{0.4884}} \quad , \quad (3)$$

$$\psi = 73.89 \frac{D_r^{2.1940}}{p'_{\text{cs}}^{0.2670}} \quad . \quad (4)$$

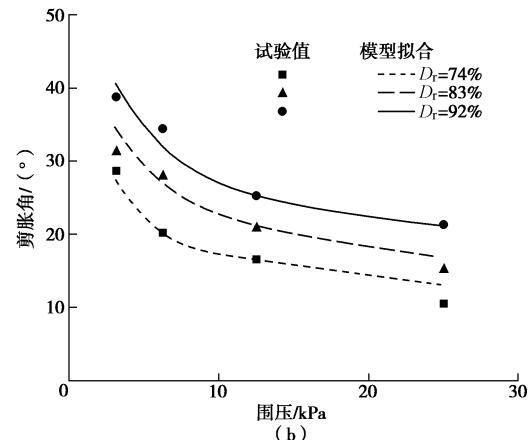
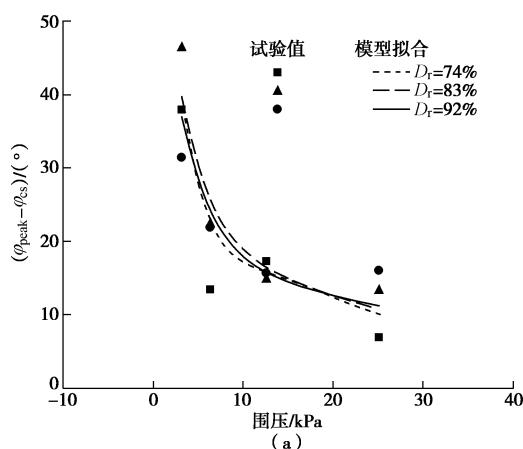


图 8 峰值摩擦角和剪胀角随围压的变化

Fig. 8 Variation of friction angle and dilatancy angle with confining stress

## 5 讨论

### 5.1 低围压下饱和砂土的特性研究

20世纪70年代美国科罗拉多州立大学 Ponce 等<sup>[24]</sup>采用洁净均匀的饱和石英砂样, 采用排水三轴压缩试验, 研究了围压从下 35 psi 下降到 0.2 psi (即 240~1.4 kPa) 饱和砂强度参数的变化。结果表明砂在低应力状态下增强的剪胀效应引起破坏时主应力比增大, 其强度的提高主要由于表观黏聚力的增大, 而内摩擦角减小不到 0.5°, 并指出即使在最低 1.4 kPa 的围压下, 橡皮膜引起的主应力误差也不超过 10%; 1980年代日本东京大学 Fukushima 等<sup>[26]</sup>采用饱和 Toyoura 细砂试样, 同样采用排水三轴压缩试验, 研究了低围压下饱和砂的强度和变形特性对围压的依赖性。结果表明在 50 kPa 的围压内: ①随着围压的增大, 内摩擦角仅有轻微的减小, 而表观黏聚力为零; ②围压的变化对变形特性的影响也相当小。

比较本文 QH-E 模拟月壤在低围压下, 围压对其强度和变形特性的影响, 与上述经典文献关于低围压对饱和砂强度和变形特性的影响是有很大差异的。毕竟模拟月壤试样是含水率不超过 1% 的“似干粉砂”而非饱和砂, 是特殊的无黏性土, 也不涉及加载应变速率对孔压消散的影响问题。

### 5.2 试验环境的影响

本次试验毕竟是地球上进行的。在地球环境里, 在中到高的围压(或平均应力)水平下, 重力对试样特性的影响或许并不明显, 但在围压很低或重力变小时(如低重力场), 由于粒间应力很小, 作用在土颗粒上的自重应力将对颗粒或粒群的移动产生显著的影响, 这将反过来引起土的组构(fabric)变化, 从而导致对土的强度和变形特性起作用的粒间摩擦力产生重

要的变化<sup>[28]</sup>。

在地球上试验的局限性对岩土和探月工程有着重要的影响。比如,在零或者接近零的有效应力状态下,目前并无直接的手段量化评估粒间嵌锁作用对土的抗剪强度的贡献。但近轨道的航天飞船上的微重力环境可提供独特的测试土的力学特性的机会。这种环境可消除试样自重、试样尺寸的影响;最大限度地减小边界条件的影响,使整个试样达到均一的近零有效应力状态成为可能<sup>[28]</sup>。

### 5.3 关于提供围压的介质

对于低围压水平的三轴试验,当试样高度较大时,压力室内水的自重对围压的影响是不可忽视的。如果试验中不需要测试试样的体积变化,则可用空气代替水来提供围压,以尽量消除围压介质自重的影响。

## 6 结 论

针对现有探月装置与月壤的相互作用问题大多集中在月表或月面浅层月壤应力水平很低的特点,采用高精度传感器和专门技术,对清华研制的 QH-E 模拟月壤实施三轴压缩试验,提交了 QH-E 模拟月壤在低围压水平下的力学性质,及强度与变形参数,结论有:

(1) QH-E 模拟月壤在本文的常规围压范围和低围压范围下均具有明显的应变软化特征;在低围压水平下,其剪胀效应显著。

(2) 相对密度相同时, QH-E 模拟月壤在低围压水平下的峰值摩擦角比常规围压水平下的更大,低围压水平下,相对密度对 QH-E 模拟月壤的峰值摩擦角影响较大,但对残余摩擦角的影响较小。当相对密度从 74% 增大到 92%, 峰值摩擦角从 45.13° 增大到 54.47°, 而残余摩擦角仅增大不到 2°。

(3) 在低围压水平下,剪胀角对围压的变化非常敏感,这一点应引起充分的重视。文中给出的 QH-E 切线模量、剪切模量、剪胀角等参数的试验数据,可为了解低围压水平下模拟月壤真实的力学特性,及开展探月装置和模拟月壤相互作用的数值分析等,提供参考。

(4) 本文低围压下 QH-E 模拟月壤的强度与变形特性与美国 Ponce and Bell、日本 Fukushima and Tatsuoka 关于低围压下饱和砂土强度与变形特性的先锋性研究结果有很大的不同,反映出 QH-E 模拟月壤材料的强度与变形性质具有独特性。

## 参 考 文 献:

[1] HEIKEN Grant, VANIMAN David, BEVAN M French. Lunar sourcebook: a user's guide to the moon[M]. Cambridge:

Cambridge University Press, 1991: 475 - 594.

- [2] CARRIER W David. The four things you need to know about the geotechnical properties of lunar soil[R]. Florida: Lunar Geotechnical Institute, 2005.
- [3] CARRIER W David. Particle size distribution of lunar soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, **129**(10): 956 - 959.
- [4] RICHMAN D, HOELZER H, CARPENTER P, et al. A quantitative method for evaluating regolith stimulants[C]// Space Technology and Applications Int. Forum—STAIF 2007, New York: AIP Publishing, 957 - 963.
- [5] DAVID S McKay, JAMES L Carter, WALTER W Boles, et al. JSC-1: a new lunar soil simulant[C]// Proceeding of Engineering, Construction, and Operations in Space. Vol. IV, ASCE Publishing, 1994: 857 - 866.
- [6] WILLMAN B M, BOLES W B, MCKAY D S, et al. Properties of lunar soil simulant JSC-1[J]. Journal of Aerospace Engineering, 1995, **8**(2): 77 - 87.
- [7] KLOSKY J Ledlie, STURE Stein, KO Hon-Yim, et al. Geotechnical behavior of JSC-1 lunar soil simulant[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2000, **13** (4): 133 - 138.
- [8] ALSHIBLI Khalid A, HASAN Alsidqi. Strength properties of JSC-1A lunar regolith simulant[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(5): 673 - 679.
- [9] MATTHEW R Everingham, NICHOLAS Pelster, ROBERT P Mueller, et al. Preparation and handling large quantities of JSC-1a lunar regolith simulant for the 2007 regolith excavation challenge[C]// Space Technology and Applications International Forum-STAIF 2008, New York: AIP publishing, 2008: 268 - 273.
- [10] RAME E, WIKINSON A, ELLIOT A, et al. Flowability of JSC-1a[R]. Ohio: National Center for Space Exploration Research, 2010.
- [11] HAYDAR Arslan, SUSAN Batiste, STEIN Sture. Engineering properties of lunar soil simulant JSC-1A[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2010, **23**(1): 70 - 83.
- [12] ZHENG Yong-chun, WANG Shi-jie, FENG Jun-ming, et al. CAS-1 simulated lunar soil[J]. Acta Mineralogical Sinica. 2007, **27**(3/4): 571 - 578.
- [13] ZHENG Yong-chun, WANG Shi-jie, OUYANG Zi-yuan, et al. CAS-1 lunar soil simulant[J]. Advances in Space Research, 2009, **43**: 448 - 454.
- [14] LI Yong-quan, LIU Jian-zhong, YUE Zong-yu. NAO-1: lunar highland soil simulant developed in China[J]. Journal of

Aerospace Engineering, 2009, **21**(1): 53 - 57.

[15] 肖 龙, 贺新星, 吴 涛, 等. 月壤的性质与模拟月壤 CUG-1A [C]// 中国空间科学学会第七次学术年会. 大连, 2009. (XIAO Long, HE Xin-xing, WU Tao, et al. NAO-1: The character of the lunar soil and the simulated lunar soil CUG-1A[C]// The Seventh Annual Seminar of Space Science Society of China. Dalian, 2009. (in Chinese))

[16] 王 凯. 钻进取样模拟月壤的主要物理力学性质试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2012. (WANG Kai. Experimental study on physical and mechanical properties of lunar soil simulant for drilling[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012. (in Chinese))

[17] 李志刚. 人工装置与模拟月壤相互作用的土工离心模型试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2008. (LI Zhi-gang. Research on geotechnical centrifuge model tests on interaction between artificial device and simulated lunar soil[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese))

[18] 李建桥, 邹 猛, 贾 阳, 等. 用于月面车辆力学试验的模拟月壤研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(6): 1557 - 1561. (LI Jian-qiao, ZOU Meng, GU Yang, et al. Lunar soil simulant for vehicle-terramechanics research in labtory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(6): 1557 - 1561. (in Chinese))

[19] 蒋明镜, 李立青. TJ-1 模拟月壤的研制[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(2): 209 - 214. (JIANG Ming-jing, LI Li-qing. Development of TJ-1 lunar soil simulant[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(2): 209 - 214. (in Chinese))

[20] 蒋明镜, 李立青, 刘 芳, 等. 含水率和颗粒级配对 TJ-1 模拟月壤力学性能影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(7): 1921 - 1925. (JIANG Ming-jing, LI Li-qing, LIU Fang, et al. Effects of moisture content and gradation on mechanical properties of TJ-1 lunar soil simulant[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(7): 1921 - 1925. (in Chinese))

[21] 邹 猛, 李建桥, 何 玲, 等. 不同粒径分布模拟月壤承压特性试验研究[J]. 航空学报, 2012, **33**(12): 2338 - 2346. (ZOU Meng, LI Jian-qiao, HE Ling, et al. Experimental study on the pressure-sinkage characteristic of the simulant regolith with different Particle size distribution[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, **33**(12): 2338 - 2346. (in Chinese))

[22] 邹 猛, 李建桥, 刘国敏, 等. 模拟月壤地面力学性质试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(4): 1057 - 1061. (ZOU Meng, LI Jian-qiao, LIU Guo-min, et al. Experimental study of terra-Mechanics characters of simulant lunar soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(4): 1057 - 1061. (in Chinese))

[23] 杨艳静, 向树红. 模拟月壤力学性质的试验和仿真研究[J]. 航天器环境工程, 2009, **26**(增刊): 1 - 4. (YANG Yan-jing, XIANG Shu-hong. The mechanical properties of the test and simulation study on simulated lunar soil[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, **26**(S): 1 - 4. (in Chinese))

[24] PONCE M, BELL J M. Shear strength of sand at extremely low pressures[J]. Journal of Soil mechanics and Foundations, 1971, **97**(SM4): 625 - 638.

[25] STROUD M A. The behavior of sand at low stress level in the simple direct-sheer apparatus[D]. Cambridge: Cambridge University, 1971.

[26] FUKUSHINA S, TATSUOKA F. Strength and deformation characteristics of saturated sand at extremely low pressures[J]. Soils and Foundations, 1984, **24**(4): 31 - 48.

[27] STURE S, COSTES N, BATISTE S, et al. Mechanics of granular materials at low effective stresses[J]. J Aerosp Eng, 1998, **11**(3): 67 - 72.

[28] ALSHIBLI K A, STURE S, COSTES N C. Constitutive and stability behavior of soils in microgravity environment[C]// AIP Conf Proc Albuquerque. 2000.